

# 精密和超精密加工机床的现状与发展对策

董吉洪

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 精密和超精密加工技术的发展直接影响尖端技术和国防工业的发展。精密和超精密加工机床是精密和超精密加工技术的基础, 本文在论述目前国内外超精密加工机床的现状的同时, 介绍了国内外有代表性的几种超精密加工机床, 并通过对比说明提出了我国应重视超精密加工机床的研究、加大投入的观点, 对精密和超精密加工机床的发展对策给出了几条建议。

**关键词:** 精密; 超精密; 机床; 发展

**中图分类号:** TG456

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/OMEI 20102710.0001

## 1 精密和超精密加工机床发展的意义

精密和超精密加工技术的发展直接影响到一个国家尖端技术和国防工业的发展, 因此, 世界各国对此都极为重视, 投入很大力量进行研究开发, 同时实行技术保密, 控制关键加工技术及设备出口。随着航空航天、高精密仪器仪表、惯导平台、光学和激光等技术的迅猛发展和多领域的广泛应用, 对各种高精度复杂零件、光学零件、高精度平面、曲面和复杂形状的加工需求日益迫切。目前, 国外已开发了多种精密和超精密车削、磨削、抛光等机床设备, 发展了新的精密加工和精密测量技术。

制造业是一个国家或地区国民经济的重要支柱, 其竞争能力最终体现在新生产的工业产品市场

占有率上, 而制造技术则是发展制造业并提高其产品竞争力的关键。随着高技术的蓬勃发展和应用, 发达国家提出了“先进制造技术”(AMT)新概念。所谓先进制造技术, 就是将机械工程技术、电子信息技术(包括微电子、光电子、计算机软硬件、现代通信技术)和自动化技术, 以及材料技术、现代管理技术综合应用于产品的计划、设计、制造、检测、管理、供销和售后服务全过程的综合集成生产技术。先进制造技术追求的目标就是实现优质、精确、省料、节能、清洁、高效、灵活生产, 满足社会需求。

从先进制造技术的技术实质性而论, 主要有精密和超精密加工技术和制造自动化两大领域, 前者追求加工上的精度和表面质量极限, 后者包括了产

品设计、制造和管理的自动化,它不仅是快速响应市场需求、提高生产率、改善劳动条件的重要手段,而且是保证产品质量的有效举措。两者有密切关系,许多精密和超精密加工要依靠自动化技术得以达到预期指标,而不少制造自动化有赖于精密加工才能准确可靠地实现。两者具有全局的、决定性的作用,是先进制造技术的支柱。

最近几年,我国的机床制造业虽然发展很快,年产量和出口量都明显增加,成为世界机床最大消费国和第一大进口国,在精密机床设备制造方面取得不小进展,但仍和国外有较大差距。从表1中我国机床生产、消费和进口情况的数字可以看出,我国还没有根本扭转大量进口昂贵的数控和精密机床、出口廉价中低档次机床的基本状况。

表1 我国机床进出口情况 (亿美元)

年度	产值	出口	进口	消费
2000	21.97	2.99	18.90	37.88
2003	23.80	3.80	41.60	67.00
2006	64.00	11.90	72.40	131.10
2007	111.9	16.50	70.70	166.10

由于国外对我们封锁禁运一些重要的高精度机床设备和仪器,而这些精密设备仪器正是国防和尖端技术发展所迫切需要的,因此,我们必须投入必要的人力物力,自主发展精密和超精密加工机床,使我国的国防和科技发展不会受制于人。

## 2 精密和超精密加工机床的现状与发展趋势

超精密加工目前尚没有统一的定义,在不同的历史时期、不同的科学技术发展水平情况下,有不同的理解。目前,工业发达国家的一般工厂已能稳定掌握 $3\mu\text{m}$ 的加工精度(我国为 $5\mu\text{m}$ )。因此,通常称低于此值的加工为普通精度加工,而高于此值的加工则称之为高精度加工。

在高精度加工的范畴内,根据精度水平的不同,分为3个档次:

精度为 $0.3\sim 3\mu\text{m}$ ,粗糙度为 $0.03\sim 0.3\mu\text{m}$ 的为精密加工;

精度为 $0.03\sim 0.3\mu\text{m}$ ,粗糙度为 $0.005\sim 0.03\mu\text{m}$ 的称作超精密加工,或亚微米加工;

精度为 $0.03\mu\text{m}$ ( $30\text{ nm}$ ),粗糙度优于 $0.005\mu\text{m}$ 以上的则称为纳米( $\text{nm}$ )加工<sup>[1]</sup>。

### 2.1 国外精密和超精密加工机床技术现状

发展超精密机床是发展超精密加工的极重要内容,各发达国家都发展了多种超精密机床。超精密机床也向着高精度、多功能和高效专用方向发展。

#### 2.1.1 美国生产的超精密加工机床

美国是开展超精密加工技术研究最早的国家,也是迄今处于世界领先地位的国家。早在20世纪50年代末,由于航天等尖端技术发展的需要,美国首先发展了金刚石刀具的超精密切削技术,称为“SPDT技术”(Single point diamond turning)或“微英寸技术”(1微英寸= $0.025\mu\text{m}$ ),并发展了相应的空气轴承主轴的超精密机床,用于加工激光核聚变反射镜、战术导弹及载人飞船用球面非球面大型零件等。如美国LLL实验室和Y-12工厂在美国能源部支持下于1983年7月研制成功大型超精密金刚石车床DTM-3型,该机床可加工最大零件 $\Phi 2100\text{ mm}$ 、重量 $4500\text{ kg}$ 的激光核聚变用各种金属反射镜、红外装置用零件、大型天体望远镜(包括X光天体望远镜)等。该机床的加工精度形状误差可达到 $28\text{ nm}$ (半径),圆度和平面度为 $12.5\text{ nm}$ ,加工表面粗糙度为 $Ra4.2\text{ nm}$ 。该实验室1984年研制的LODTM大型金刚石可加工直径为 $2.1\text{ m}$ ,重为 $4.5\text{ t}$ 的工件。采用高压液体静压导轨,在 $1.07\text{ m}\times 1.12\text{ m}$ 范围内直线度误差 $<0.025\mu\text{m}$ (在每个溜板上装有标准平尺,通过测量和修正来达到),位移误差不超过 $0.013\mu\text{m}$ (用氦屏蔽的激光干涉仪来测量和反馈控制达到),主轴溜板运动偏摆 $<0.057''$ (通过两路激光干涉仪测量、压电陶瓷修正来实现)。激光测量系统有单独的花岗岩支架系统,不与机床联结。油喷淋冷却系统可将油温控制在 $(20\pm 0.0025)^\circ\text{C}$ 。采用摩擦驱动,推力可

达1 360 N, 运动分辨率达  $0.005\mu\text{m}$ 。

美国 Moore 公司 2000 年生产的五轴联动 500 FG 超精密机床 (见图 1) 不仅可以加工精密回转体非球曲面, 还可加工精密自由曲面。该机床空气轴承主轴转速  $20\sim 2\,000\text{ r/min}$ , 主轴回转误差  $\leq 0.025\mu\text{m}$ 。液体静压导轨由无刷直线电机驱动, 直线度误差  $\leq 0.025\mu\text{m}/300\text{ mm}$ , 定位精度  $0.3\mu\text{m}^{[2]}$ 。

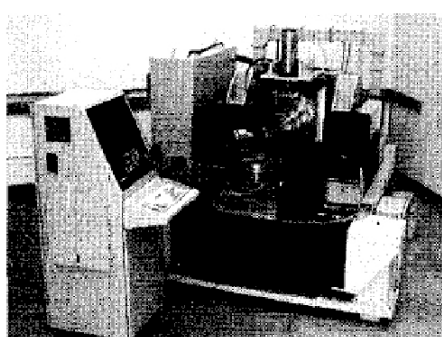


图 1 美国 Moore 公司的 500FG 超精密机床

### 2.1.2 英国生产的超精密加工机床

在超精密加工技术领域, 英国克兰菲尔德技术学院所属的克兰菲尔德精密工程研究所 (简称 CUPE) 享有较高声誉, 它是当今世界上精密工程的研究中心之一, 是英国超精密加工技术水平的独特代表。如 CUPE 生产的 Nanocentre (纳米加工中心) 既可进行超精密车削, 又带有磨头, 也可进行超精密磨削, 加工工件的形状精度可达  $0.1\mu\text{m}$ , 表面粗糙度  $Ra < 10\text{ nm}$ 。

英国 Cranfield 精加工中心于 1991 年研制成功的 OAGM-2500 (工作台面积  $2\,500\text{ mm} \times 2\,500\text{ mm}$ ) 多功能三座标联动数控磨床, 可加工 (磨削、车削) 和测量精密自由曲面, 并且该机床采用加工件拼合方法, 加工成功天文望远镜中直径  $7.5\text{ m}$  的大型反射镜<sup>[2]</sup>。

### 2.1.3 日本生产的超精密加工机床

日本对超精密加工技术的研究相对于美、英来说起步较晚, 但却是当今世界上超精密加工技术发展最快的国家。日本的研究重点不同于美国, 前者是以民品应用为主要对象, 后者则是以发展国防尖

端技术为主要目标。因此, 日本在用于声、光、图像、办公设备中的小型、超小型电子和光学零件的超精密加工技术方面, 是更加先进和具有优势的, 甚至超过了美国。

20 世纪 80 年代, 超精密车削加工技术在美国、英国及日本等国发展较快, 可加工铝、铜合金的镜面。但随着机床工业的发展, 对床身、导轨、立柱等大中型结构件的精度的要求不断提高, 仅靠手工研磨已不能适应生产发展的需要。例如三坐标测量机的横梁, 陶瓷工件的加工直线性要求  $1\mu\text{m}/1\,800\text{ mm}$ ; 半导体制造方面也要求  $0.5\sim 1\mu\text{m}/500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$  这样高的精度, 在这种情况下, 日本住友重机械公司历经 6 年于 1985 年研制成功的 KSX-815 超精密平面磨床获得日刊工业新闻社选定的 1991 年“十大新产品奖”。其主要指标如表 2 所示。

表2 KSX-815 超精密平面磨床主要指标

工作台尺寸 (宽×长)	800 mm×1 500 mm
最大加工高度	500 mm
最大通过宽度	1 100 mm
工作台进给速度	0.01~30 m/min
砂轮尺寸 (外径×宽)	$\Phi 510\text{ mm} \times 100\text{ mm}$
砂轮转速	1 000~4 000 r/min
砂轮最小进刀量	$0.2\mu\text{m}$
磨头的纵向移动距离	300 mm
磨头的纵向进给速度	1~1 000 mm/min
磨头的横向进给速度	1~4 000 mm/min
砂轮轴驱动电机	11 kW (4P)
机床尺寸 (宽×长×高)	约 $3\,600\text{ mm} \times 5\,800\text{ mm} \times 3\,700\text{ mm}$
机床重量	约 18 500 kg
控制装置	FANUC 10MA

用该磨床磨削  $1\,500\text{ mm}$  的工件, 直线度达到  $0.9\mu\text{m}$ 。磨削  $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$  的平板, 其平面度达到  $1\mu\text{m}$ 。

西铁成公司的 SG-530 型 NC 超精密平面磨床为了尽可能地提高精度, 消除了磨擦、间隙等非线性因素, 采用静压轴承。为控制由于热引起的机床变形, 采用了对称两支承门型结构以及两端支承主轴结构。主要规格如表 3 所示。

表3 SG-530型 NC超精密平面磨床

工作台工作面积(长×宽)	500 mm×300 mm
工作台左右行程(X轴)	Max. 790 mm
导轨前后行程(Y轴)	Max. 350 mm
砂轮上下行程(Z轴)	Max. 170 mm
工作台面距砂轮轴心的距离	185~355 mm
工作台左右最小进给量(X轴)	0.001 mm
导轨前后最小进给量(Y轴)	0.000 1 mm
砂轮上下最小进给量(Z轴)	0.000 1 mm
工作台左右进给速度(X轴)	Max. 20 m/min
导轨前后进给速度(Y轴)	Max. 0.8 m/min
导轮上下进给速度(Z轴)	Max. 0.4 m/min
砂轮尺寸(外径×内径×厚度)	Φ255 mm×Φ127 mm×25t mm
砂轮转速	Max. 3 750 r/min
主轴电机	37 kW
控制装置	FANUC SUSTEM OM
占地面积	3 050 mm×1 950 mm
主机重量	3 000 kg

用此磨床加工 500 mm×300 mm 的平板, 用自动准直仪测量其平面度为 0.6  $\mu\text{m}$ ; 加工用于激光打印机的透镜(复曲面, 即 XZ 断面和 YZ 断面具有不同的曲率半径), 其形状精度可达 0.63  $\mu\text{m}$ <sup>[2]</sup>。

#### 2.1.4 德国、瑞士等生产的超精密加工机床

德国 JUNG 公司是国际上知名度较高的平面磨床生产厂, 有 40 余年的历史, 该公司的平面和成型磨床以精度高、使用寿命长而著称。JUNG 公司的主要平磨产品均采用立柱升降式, 外形小巧, 磨削精度高。工作台纵向运动一般都设两套运动装置, 往复运动由液压驱动, 缓进给成型磨削采用机电传动。JUNG 公司平面磨床基型有 JF415 (400 mm×150 mm)、JF520 (500 mm×200 mm)、JF625 (600×250 mm) 等。其中水平较高的是 JF520CNC B 型四坐标数控平面和成型磨床。该设备采用高精度连续轨迹控制以及图形辅助操作, 控制系统以西门子 SINUMERIK810 为基础, 配用 JUNG 公司开发的专用软件。JP 系列是 JUNG 公司最新产品, 该系列机床一反 JUNG 公司的传统结构, 首次采用了龙门式框架结构, 可以满足大尺寸工件和新型工程材料的磨削加工需要。

瑞士 DIXI 公司以生产卧式坐标镗床闻名于世, 现在该厂生产的高精度镗床 DHP40 (图 2) 已加上多轴数控系统成为加工中心, 同时为使用高速切削, 已将主轴最高转速提高到 24 000 r/min。图 3 所示是瑞士 MIKROM 公司的高速精密五轴加工中心, 它的主轴最高转速为 42 000 r/min, 定位精度达到 5  $\mu\text{m}$ , 已达到过去坐标镗床的精度<sup>[2]</sup>。

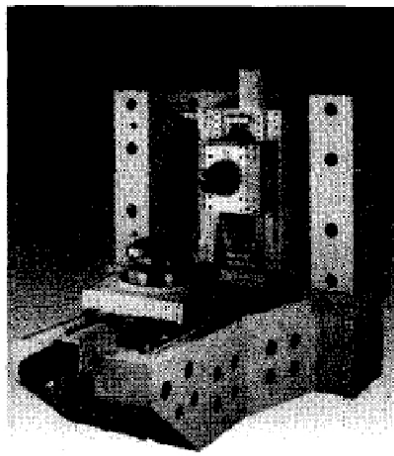


图2 瑞士DIXI的DHP40卧式精密高速镗床

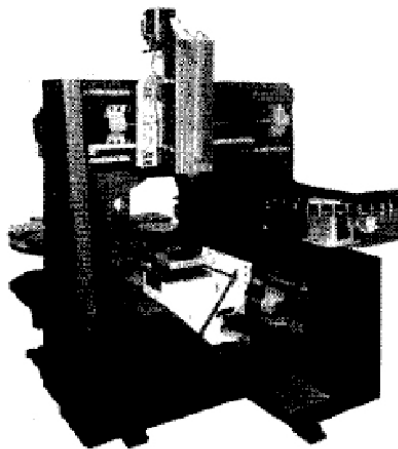


图3 瑞士MIKROM公司的高速精密五轴加工中心

## 2.2 国内精密和超精密加工机床技术现状

我国的超精密加工技术在上世纪 70 年代末期有了长足进步, 80 年代中期出现了具有世界水平的超精密机床和部件。北京机床研究所是国内进行超精密加工技术研究的主要单位之一, 研制出了多种不同类型的超精密机床、部件和相关的高精度测试



仪器等,如精度达  $0.025\ \mu\text{m}$  的精密轴承、JCS-027 超精密车床、JCS-031 超精密铣床、JCS-035 超精密车床、超精密车床数控系统、复印机感光鼓加工机床、红外大功率激光反射镜、超精密振动-位移测微仪等,达到了国内领先、国际先进水平。航空航天工业部 303 所在超精密主轴、花岗岩坐标测量机等方面进行了深入研究及产品生产。哈尔滨工业大学在金刚石超精密切削、金刚石刀具晶体定向和刃磨、金刚石微粉砂轮电解在线修整技术等方面进行了卓有成效的研究。清华大学在集成电路超精密加工设备、磁盘加工及检测设备、微位移工作台、超精密砂带磨削和研抛、金刚石微粉砂轮超精密磨削、非圆截面超精密切削等方面进行了深入研究,并有相应产品问世。此外,中科院长春光学精密机械与物理研究所、华中理工大学、沈阳第一机床厂、成都工具研究所、国防科技大学等都进行了这一领域的研究,成绩显著。但总的来说,我国在超精密加工机床的效率、精度、可靠性,特别是规格(大尺寸)和技术配套性方面与国外相比,与生产实际要求相比,还有相当大的差距<sup>[3-5]</sup>。

下面列举几种国内超精密加工机床。

NAM-800 型纳米数控车床是北京机床研究所最新一代的纳米级加工机床。它是当今数控技术、伺服技术、机械制造技术完美的统一。该机床为我国最前沿的科技发展提供了良好的加工手段。图 4 所示为 NAM-800 型纳米数控车床,其主要性能指标如表 4 所示<sup>[6]</sup>。

航空航天工业部 303 所研制的非球面曲面超精密加工机床车削加工样件的面形精度  $PV=0.228\ \mu\text{m}$ ,

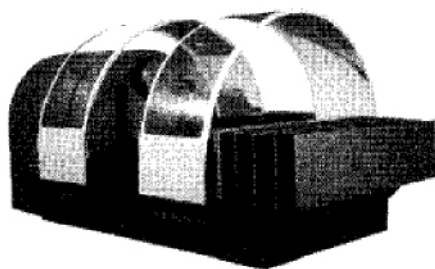


图4 NAM-800型纳米数控车床

表4 NAM-800型纳米数控车床主要技术性能

主轴回转精度	30 nm
主轴转速	50~1 500 r/min
溜板直线性	$0.15\ \mu\text{m}/200\ \text{mm}$
行程 ( $X \times Z$ )	400 mm $\times$ 400 mm
反馈系统分辨率	2.5 nm
控制系统分辨率	5 nm
最大加工工件直径	$\Phi 800\ \text{mm}$
最大加工工件长度	400 mm
定位精度	$\pm 0.2\ \mu\text{m}/400\ \text{mm};$ $\pm 0.1\ \mu\text{m}/100\ \text{mm}$
加工件表面粗糙度 (铝、无氧铜)	$Ra 2 \sim 5\ \text{nm}$
尺寸控制精度	$\pm 10\ \text{nm}$

表面粗糙度  $Ra=0.0078\ \mu\text{m}$ 。303 所研制的 JCS-031 超精密金刚石铣床的技术指标如表 5 所示<sup>[7]</sup>。

表5 JCS-031超精密金刚石铣床技术指标

主轴回转精度	$0.05\ \mu\text{m}$
溜板直线性	$0.1\ \mu\text{m}/100\ \text{mm}$
溜板行程 ( $X \times Z$ )	200 mm $\times$ 20 mm
加工件表面粗糙度 (有色金属)	$Ra 0.003\ \mu\text{m}$
平面度 (直径 50 mm)	$0.1\ \mu\text{m}$

图 5 为哈尔滨工业大学研制的超精密车床,其具有两坐标精密数控系统和两坐标激光在线测量系统,可以加工非球面回转曲面。图 6 为哈尔滨工业大学研制的加工 KDP 晶体大平面的超精密铣床。KDP 晶体可用于光学倍频,是大功率激光系统中的重要元件。

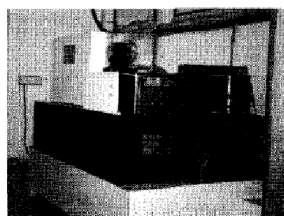


图5 超精密车床

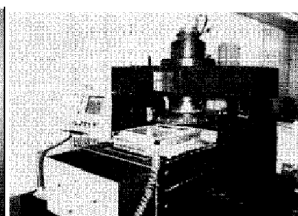


图6 超精密铣床

### 2.3 超精密加工机床的发展趋势

超精密加工技术的发展趋势是:向更高精度、更高效率方向发展;向大型化、微型化方向发展;向加工检测一体化方向发展;机床向多功能模块化

方向发展;不断探索适合于超精密加工的新原理、新方法、新材料是研制和制造超精密加工机床的关键。

### 3 我国精密和超精密加工机床的发展对策

精密和超精密加工技术是和国防尖端技术相互联系的,超精密加工技术是以高精度为目标的技术,它必须综合应用各种新技术,在各个方面精益求精的条件下,才有可能突破常规技术达不到的精度界限,达到新的高精度指标。超精密加工机床技术是超精密加工技术在工业生产中的体现,是一个国家生产力水平的重要标志。因此,大力发展我国精密和超精密加工技术是增强我国综合实力的有力手段,而我国发展精密和超精密加工机床可以从以下三方面进行。

#### 3.1 注重基础、打好根基

一个国家制造业水平的高低,很大程度上取决于其基础制造装备水平的高低。2005年我国数控机床市场总容量约30 000台,中、高档市场年需求量12 000台,其中数控车床、加工中心(包括数控铣床)占60%,约7 000台。基础制造装备不仅需求量大,而且对装备的技术水平的要求越来越高,如飞机制造业中的大台面多坐标数控龙门铣床、高速加工中心、专用高速蜂窝铣等。

超精密加工机床按加工原理可分为超精密切削、超精密磨削、研磨、抛光及超精密微细加工等。尽管各自在原理和方法上有很大的区别,但有着诸多可继承的共性技术,发展好共性技术,对超精密机床进行模块化设计是快速发展的捷径。下面列举了几个发展超精密加工机床需要特别重视的单元技术。

##### 3.1.1 超精密运动部件

超精密加工就是在超精密机床设备上,利用零件与刀具之间产生的具有严格约束的相对运动,对材料进行微量切削,以获得极高形状精度和表面光洁度的加工过程。超精密运动部件是产生上述相对

运动的关键,它分为回转运动部件和直线运动部件两类。

高速回转运动部件通常是机床的主轴,目前普遍采用气体静压主轴和液体静压主轴。气体静压主轴的主要特点是回转精度高,如Pneumo公司的Nanoform250车床采用气体静压主轴,回转精度优于 $0.05\mu\text{m}$ ;其缺点是刚度偏低,一般 $<100\text{ N}/\mu\text{m}^{[8]}$ 。

近年来,在提高气浮主轴刚度方面有很多研究,如德国Kugler公司开发了半球型气浮主轴,刚度高达 $350\text{ N}/\mu\text{m}$ ;日本学者利用主动控制的方法增加主轴刚度,同时提高了回转精度;荷兰Eindhoven科技大学研制的薄膜结构被动补偿气浮轴承静刚度可趋于无穷,动刚度也大大提高。液体静压主轴与气浮主轴相比,具有承载能力大、阻尼大、动刚度好的优点,但容易发热,精度也稍差。

直线运动部件是指机床导轨,同样有气体静压导轨和液体静压导轨两种。由于导轨承载往往大于机床主轴而运动速度较低,超精密机床大多采用后者,如美国LLNL研制的LODTM采用的高压液体静压导轨,直线度误差 $<0.025\mu\text{m}/1\ 000\text{ mm}$ 。同样,主动控制的方法适用于提高气浮导轨静态刚度,日本Tottori大学的Mizumoto等人将这一技术应用到其设计的超精密车床中,提高了导轨直线度。

##### 3.1.2 超精密运动驱动与传递

为了获得较高的运动精度和分辨率,超精密机床对运动驱动和传递系统有很高的要求,既要求有平稳的超低速运动特性,又要有大的调速范围,还要求电磁兼容性好。

一般来说,超精密运动驱动有两种方式:直接驱动和间接驱动。直接驱动主要采用直线电机,可以减少中间环节带来的误差,具有动态特性好、机械结构简单、低摩擦的优点,主要问题是行程短、推力小。另外,由于摩擦小,很容易发生振荡,需要用优秀的控制策略来弥补。间接驱动是由电机产生回转运动,然后通过运动传递装置将回转运动转换成直线运动。它是目前超精密机床运动驱动方式

的主流。电机通常采用低速性能好的直流伺服电机,如美国 Park Hannifin 公司的 DM 和 DR 系列直接驱动伺服执行器,输出力矩大,位置控制分辨率达到 64 万分之一。运动传递装置通常由联轴器、丝杠和螺母组成,它们的精度和性能将直接影响运动平稳性和精度,也是间接驱动方式的主要误差来源。美国麻省理工学院设计了两种联轴节,分别采用球槽和柔性铰链结构,用于消除电机与丝杠不同轴误差。我国国防科技大学设计了一种框架式浮动单元,用于连接螺母和工作台,可消除 4 个方向的运动误差。丝杠往往选择高精度的滚珠丝杠,另外也有气浮丝杠和磁浮丝杠用于超精密机床的实验研究,如俄罗斯研制的气浮/磁浮丝杠分辨率达到了  $0.01\ \mu\text{m}$ 。日本新宿大学的 Fu kada 通过在滑动丝杠、螺母和工作台间插入弹性体,将扭矩转化为微位移,使滑动丝杠达到纳米级分辨率。

在驱动方式上还有突破传统的创新研究,如日本 Tottori 大学的 Mizumoto 等人研制的扭轮摩擦装置,分辨率达到纳米量级;我国国防科技大学研制的扭轮摩擦装置的分辨率也接近纳米级水平。

### 3.1.3 超精密机床数控技术

超精密机床要求其数控系统具有高编程分辨率 (1 nm) 和快速插补功能 (插补周期 0.1 ms)。基于 PC 机和数字信号处理芯片 (DSP) 的主从式硬件结构是超精密数控的潮流,如美国的 NAN OPATH 和 PRECITECH'S ULTRAPATH TM 都采用了这一结构。数控系统的硬件运动控制模块 (PMAC) 开发应用越来越广泛,使此类数控系统的可靠性和可重构性得到提高。我国国防科技大学研制开发的 YH-1 型数控系统采用 ASW-824 工业一体化 PC 工作站为主机,用 ADSP2181 信号处理器模块构成高速下位伺服控制器。

在数控软件方面,开放性是一个发展方向。国外有关开放性数控系统的研究有欧共体的 OS ACA、美国的 OMAC 和日本的 OSEC。我国国防科技大学在此基础上提出了构件化多自由度运动控制软件,

可根据机床成形系统的布局任意组装软件,符合机床模块化发展的方向。

### 3.1.4 超精密运动检测技术

为保证超精密机床有足够的定位精度和跟踪精度,数控系统必须采用全闭环结构,高精度运动检测是进行全闭环控制的必要条件。双频激光干涉仪具有高分辨率 (如 ZYGO AX10MTM 2/20 分辨率为 1.25 nm) 与高稳定性,测量范围大,适合作为机床运动线位移传感器使用。但双频激光干涉仪对环境要求过于苛刻,使用和调整非常困难,使用不当会大大降低精度。德国 Heidenhain 公司生产的光栅尺更适合超精密机床运动检测,如该公司的 LI P401,材料长度 220 mm,分辨率为 2 nm,采用 Zerodur 材料制成几乎达到零膨胀系数 ( $0.1\ \text{ppm/k}$ ),动静尺间隙为  $(0.6\pm 0.1)\ \text{mm}$ ,对环境要求低,安装和使用方便。Nanoform 2 500 和 Optimum 2 400 超精密车床都使用了 Heidenhain 光栅尺。

### 3.1.5 超精密机床布局与整体技术

模块化、构件化是超精密机床进入市场的重要手段,如美国 ANORAD 公司生产各种主轴、导轨和转台,用户可根据各自的需要组成一维、二维和三维超精密运动控制平台和机床。研制超精密机床时,布局就显得非常关键。超精密机床往往与传统机床在结构布局上有很大差别,流行的布局方式是“T”型布局,这种布局使机床整体刚度较高,控制也相对容易,如 Pneumo 公司生产的大部分超精密车床都采用这一布局<sup>[8]</sup>。模块化使机床布局更加灵活多变,如日本超硅晶体研究株式会社研制的超精密磨床,用于磨削超大硅晶片,采用三角菱形五面体结构,用于提高刚度;德国蔡司公司研制了四轴精密磨床 AS100,用于加工自由形式表面,该机床除了 X、Z 和 C 轴外,附加了 A 轴,用于加工自由表面时控制砂轮的切削点。

此外,一些超精密加工机床是针对特殊零件而设计的,如大型高精度天文望远镜采用应力变形盘加工,一些非球面镜的研抛加工采用计算机控制光学表面成形技术 (CCOS) 加工,这些机床都具有和通用机床完



全不同的结构。由此可见,超精密机床的结构有其鲜明的个性,需要特殊的设计考虑和设计手段。

### 3.1.6 其他重要技术

超精密环境控制,包括恒温、恒压、隔振、湿度控制和洁净度控制。另外,超精密加工对刀具的依赖性很大,加工工艺也很重要,对超精密机床的材料和结构都有特殊要求。

## 3.2 提高国家整体制造业水平

进入21世纪,世界经济结构正在发生重大而深刻的变革,但制造业依然是世界各发达与发展中国家加快经济发展、提高国家综合竞争力的重要途径。我国是一个制造业大国,尚处于工业化进程之中,在未来相当长的时期里,制造业仍将在国民经济中占主导地位。在新一轮国际产业结构调整中,我国正逐步成为世界最重要的制造业基地之一。然而,目前我国装备制造业的整体水平与发达国家相比尚有较大的差距,尤其是在战略必争装备技术与竞争核心技术、基础制造装备与成套关键装备制造技术等方面差距更大,这种差距又主要体现在先进装备的自主设计与独立制造能力差,成套与系统集成、优化能力差,技术创新和集成创新能力差。这些差距已经成为制约我国制造业乃至其他行业经济发展的关键瓶颈问题之一。

一个国家仅仅拥有了战略必争装备和竞争前核心技术是不够的,要想成为经济强国,完成工业化的建设,必须在装备制造业掌握有关基础制造装备与成套装备制造的核心技术。20世纪70-80年代,美国制造业发展的衰落和竞争力减弱的例子很好地说明了这一点。20世纪70年代前,美国的产品竞争力一直令对手望尘莫及,但到了80年代,美国人发现日本、德国等国家后来居上,逐步取代了他们在国际市场的霸主地位。经过认真深入地分析,他们发现其原因是美国失去了在装备制造业方面的优势,而日、德等国,特别是日本,对制造技术及装备研究的投入比例远大于美国。于是,从20世纪80年代后期开始,美国开展

了一系列旨在振兴美国装备制造业的庞大计划,加大了对制造业技术与装备研究的投入,使美国的制造业重振雄风,也使美国经济得以逐步复苏并保持持续增长的势头。

## 3.3 大力提高基础加工设备的生产能力

我国超精密机床的研制进行了数十年,北京机床研究所、航空部303所、哈尔滨工业大学、国防科学技术大学等单位都研究了自己的超精密机床,但力量分散,不能形成产品系列和产业化气候。尽管单项技术指标很高,但总体技术水平落后,不足以满足我国超精密加工行业的需要,大部分还只是停留在研究型机床的状态。因此,工业界只能花大价钱购买国外产品。

在世界经济全球化的今天,虽说绝大多数基础制造装备与成套装备都可以购买到,但对我国这样的发展中大国来说,必须掌握关键的基础制造装备与成套装备制造的核心技术,大力提高基础加工设备的生产能力,才能牢固占有国内市场,并不断开拓国际市场,在竞争中立于不败之地。

## 3.4 加强超精密加工机床相关领域的技术发展

为了提高超精密加工机床的功能和性能,必须加强相关领域的研究、如加强超精密切削机理和金刚石刀具等方面的研究、金属和非金属材料的精密磨削和研磨的研究等。

# 4 结 论

随着航空、航天、生物化学、地球物理等学科技术的迅猛发展,对精密和超精密加工技术的发展提出了更高的要求,精密和超精密加工机床的需求也越来越高。相关领域研发人员应充分将人、组织、技术有机结合起来,研制并生产出各个领域所需的精密和超精密加工机床,提高我国整体工业水平,为国防与尖端技术的发展打下坚实的基础。



## 参考文献

- [1] 袁哲俊. 纳米科学与技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2005: 150-156.
- [2] 伍娜. 世界机床生产及消费情况[J]. 数控机床市场, 2006(1): 110-113.
- [3] 秦树国. 2007年的中国机床市场[J]. 数控机床市场, 2007(2): 44-47.
- [4] 袁哲俊, 王先逵. 精密和超精密加工技术[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2007: 180-200.
- [5] 王立鼎, 凌四营, 马勇, 等. 精密、超精密圆柱渐开线齿轮的加工方法 [J]. 光学 精密工程, 2009, 17(2): 321-325.
- [6] 北京机床研究所. 主要产品[EB/OL].[2008-11-15]. [www.jcsjm.com/](http://www.jcsjm.com/)
- [7] 北京航空精密机械研究所. 主要产品[EB/OL].[2008-11-10]. [www.bj303.com](http://www.bj303.com)
- [8] Moore Nanotechnology Systems LLC.products[EB/OL][2008-10-20].[www.azonano.com](http://www.azonano.com)

作者简介: 董吉洪 (1972-), 男, 汉族, 吉林长春人, 学士, 研究员, 硕士生导师, 1995年于中国科学技术大学获得学士学位。主要从事光学精密机械、光学遥感技术等领域的研制开发工作。E-mail:dongjihong2002@sohu.com

## 地球空间双星探测计划获国际宇航科学院杰出团队成就奖

在第58届国际宇航联大会开幕前夕, 在国际宇航科学院 (International Academy of Astronautics, IAA) 举行的年度奖励晚会上, 我国地球空间双星探测计划与欧洲空间局星簇计划联合团队获得了2010年度的杰出团队成就奖 (The Laurels Team Achievement Award)。

杰出团队成就奖是国际宇航科学院每年颁布的两个主要科技奖项之一, 另一项奖只奖励个人。杰出团队成就奖设立于2000年, 第一次颁布是2001年, 授予了俄罗斯和平号空间站团队, 之后曾分别授予过包括美国航天飞机团队、SOHO空间计划团队、哈勃空间望远镜团队等著名空间项目团队。

地球空间双星探测计划 (简称双星计划, DSP) 是中国国家航天局实施, 欧洲空间局星簇计划团队参与的重要空间科学计划。该计划和欧洲空间局星簇 (Cluster) 计划共6颗卫星提供了前所未有的对地球空间的探测能力。双星计划由两颗卫星组成, 即探测1号 (TC-1) 和探测2号 (TC-2)。这两颗卫星分别运行于近地赤道轨道和近地极轨轨道。星簇计划由4颗相同的卫星组成四边形编队, 星间距离可在数百到数千公里之间可调, 运行在较高的地球极轨轨道上。这6颗卫星形成了人类历史上首次对地球空间的6点协调探测。从2004年到2007年, 两个计划的联合科学运行引起了国际空间科学界和公众的极大关注, 并获得了许多科学发现, 如磁尾等离子体片中的大尺度振荡, 太阳风中的离子密度空洞, 持续数小时的脉冲调制磁重联和中子星的壳层破裂。与NASA的IMAGER卫星一起, 探测2号卫星还第一次实现了从南北两极对内磁层的同时成像探测。

双星计划是中国和欧空局开展的第一次重大空间科学合作项目。中国国家航天局负责研制和发射了两颗卫星, 中国科学院负责地面数据接收和应用研究等。欧空局则向两颗卫星提供了7台源自星簇计划的科学探测仪器, 与中方联合研制了TC-2上的中性原子成像仪。此外欧空局还提供了一个卫星地面站配合中方接收科学数据, 对欧洲科学仪器的科学运行给予了协助等。